

气候变化条件下水工混凝土的抗冻性能

戈雪良¹, 苏文德², 陆采荣¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361004)

摘要: 为了提高气候变化条件下水工混凝土的抗冻耐久性, 采用自制的气候模拟系统, 设定了-5℃、-10℃、-17℃、-30℃、-40℃等5个冻融过程降温终了混凝土试件中心温度, 研究冻融温度对F50、F100、F300等3种抗冻设计等级水工混凝土的质量损失、动弹性模量的影响。试验结果表明: 随着冻融过程中降温终了试件中心温度的降低, F50、F100、F300等3种抗冻设计等级的水工混凝土的质量损失、动弹性模量损失逐渐增大, 水工混凝土能经受的最大冻融循环次数也逐渐减少。降低冻融过程中混凝土试件的中心温度可引起水工混凝土抗冻耐久性的降低。

关键词: 水工混凝土; 气候变化; 冻融中心温度; 抗冻耐久性; 试验研究

中图分类号: TV431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2015)06-0037-04

Frost resistance properties of hydraulic concrete under climate change conditions//GE Xueliang¹, SU Wende², LU Cairong¹ (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Xiamen Rail Transit Group Limited Corporation, Xiamen 361004, China)

Abstract: In order to improve the durability of frost resistance of hydraulic concrete under climate change conditions, a climate simulation system made by the authors was employed to study the effects of freeze-thaw temperatures on the weight loss and dynamic elastic modulus of hydraulic concrete with the three designed antifreeze levels F50, F100, and F300. During the test, the freeze-thaw processes were observed with set five center temperatures of concrete samples: -5℃, -10℃, -17℃, -30℃, and -40℃. The results show that, with decreasing center temperatures of samples in the freeze-thaw processes, the weight loss and dynamic elastic modulus loss of the three designed antifreeze levels gradually increase, while the maximum withstanding numbers of freeze-thaw cycles gradually decrease. That is to say that lowering the center temperatures of concrete samples in freeze-thaw processes will decrease the durability of frost resistance of hydraulic concrete.

Key words: hydraulic concrete; climate change; central temperature of freeze-thaw; durability of frost resistance; test research

我国现已建成各类水库 98 000 多座, 总库容近 9 300 多亿 m³^[1], 分布在不同气候区域, 每年经受的冻融循环次数不尽相同。《气候变化国家评估报告》预估我国在 21 世纪 20 年代、50 年代和 80 年代平均气温分别升高约 1.2℃、2.2℃和 3.2℃^[2], 气温变化将对我国水工混凝土结构物的受冻融作用区域划分产生重要影响, 大体上导致南北分界线北移, 现有分界线处以及北方地区的年平均冻融循环次数有可能显著增加, 从而加速这部分地区水工混凝土结构物的冻融破坏。另外, 气候变暖导致极端气候出现的频次增加, 极端低温甚至是突破历史极值的低温使我国北方地区已考虑抗冻设计的水工混凝土的抗冻耐久性面临新的挑战。

目前, 我国水工混凝土的抗冻融试验一般是在 -17℃±2℃的降温终了低温, 以及 8℃±2℃的升温终了温度下进行, 以此对水工混凝土的抗冻性能进行评估。水工混凝土抗冻等级的设计原则为: 在最冷月评价温度低于-10℃的严寒区一般设计 F300, 而在最冷月评价温度大于-3℃的温和区设计 F50 或 F100。国内外开展的水工混凝土抗冻耐久性方面的研究比较多, 取得了一些重要的研究成果^[3-9]。根据调研, 我国南方地区最冷月(1月)极端低温气温平均值为-8.4℃, 东北、西北、华北地区最冷月(1月)极端低温气温平均值为-32.7℃^[10]。针对现行抗冻耐久性设计原则、抗冻试验方法以及我国南方和北方地区的最冷月气温现状, 本文采用 F50、

F100、F300 等 3 种抗冻等级的水工混凝土,在-5℃、-10℃、-17℃、-30℃、-40℃等 5 种降温终了混凝土试件中心温度下进行冻融试验,研究不同冻融温度条件下不同抗冻设计等级水工混凝土的抗冻性能。

1 原材料、配合比与试验方法

1.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, I 级粉煤灰。细骨料为天然河砂,细度模数为 2.71。粗骨料为灰岩人工碎石,粒径范围为 5~40 mm。外加剂为萘系高效减水剂和 Air-202 引气剂。经检测,水泥、粉煤灰、外加剂的品质和参数均符合相应现行规程规范的技术要求,可用于试验研究。

1.2 配合比

根据气候严寒区、温和区分别要求的水工混凝土抗冻等级情况,通过优化配合比以及控制体积含气量,设计了 F50、F100、F300 等 3 种抗冻等级的水工混凝土。经测试,F50、F100、F300 水工混凝土实际含气量分别为 2.8%、3.7%、5.8%,配合比见表 1。

表 1 不同抗冻等级的水工混凝土试验配合比

编号	水胶比	水/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	粉煤灰/(kg·m ⁻³)	骨料/(kg·m ⁻³)	减水剂/%	引气剂/%
F50	0.50	121	194	49	2 075	0.50	0.008
F100	0.47	122	208	52	2 057	0.50	0.018
F300	0.38	132	278	69	1 946	0.90	0.100

1.3 试验方法

采用自行研制的 GDJS-800 气候模拟系统进行水工混凝土冻融试验,该系统可实现混凝土试件中心温度-70~150℃的变化范围,实时控制精度为 0.1℃,温度波动度为±0.5℃,可通过程序设定改变降温速率与温度恒定时间等试验参数。水工混凝土抗冻试件的成型、制作与养护按照 SL352—2006《水工混凝土试验规程》进行。

冻融试验降温终了试件中心低温分别设为-5℃、-10℃、-17℃、-30℃、-40℃,降温历时均为 2h,升温终了试件中心温度统一设为 8℃,升温历时均为 1h。经过若干个冻融循环后,采用动弹性模量测定仪(频率 100~10 000 kHz)、电子天秤(称量 10 kg,感量 5 g)分别测试混凝土的动弹性模量和质量,进而对抗冻耐久性进行评估。

2 试验结果与讨论

2.1 水工混凝土的冻融质量损失

F50、F100、F300 等 3 种抗冻设计等级的水工混凝土在-5℃、-10℃、-17℃、-30℃、-40℃等 5 种降温终了试件中心温度下,经受若干冻融循环次数后的质量损失率如图 1 所示。从图 1 可以看出,随着

冻融试验降温终了水工混凝土试件中心温度的降低,水工混凝土的质量损失率逐渐增大。200 次冻融循环后,降温终了试件中心温度从-5℃降到-40℃,中低抗冻设计等级的 F50、F100 水工混凝土的质量损失率分别从 2.6% 增大到 12.4%,以及从 2.2% 增大到 9.2%。对于高抗冻设计等级的 F300 水工混凝土而言,350 次冻融循环后,降温终了试件中心温度从-5℃降到-40℃,其质量损失率从 0.6% 增大到 7.5%。

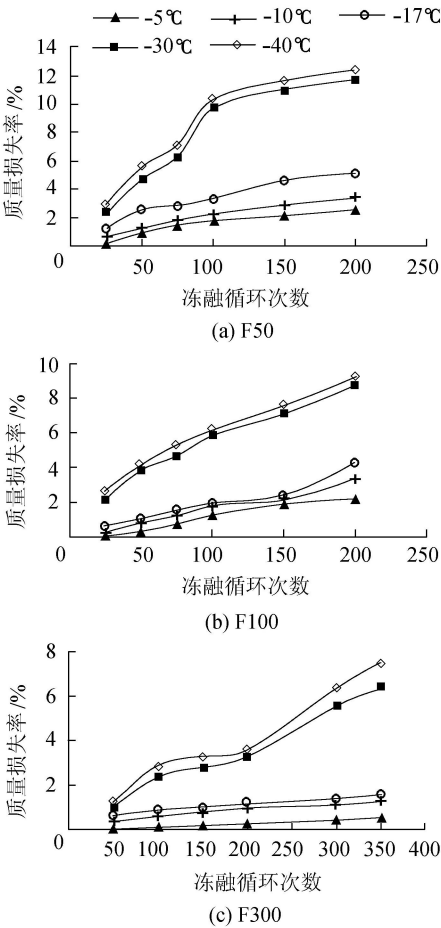


图 1 不同抗冻设计等级水工混凝土的冻融质量损失率

2.2 水工混凝土的动弹性模量变化

3 种抗冻设计等级的水工混凝土在测试完冻融质量损失后,分别进行动弹性模量测试,根据动弹性模量变化,并结合冻融质量损失情况,可对不同抗冻设计等级的水工混凝土在不同降温终了试件中心温度条件下的冻融耐久性进行评估。不同冻融循环次数下水工混凝土的动弹性模量试验结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,F50 抗冻设计等级的水工混凝土试件在-30℃降温终了试件中心温度条件下经过 150 次冻融循环后动弹性模量仅为初始值的 31%,冻融循环次数继续增加试件被冻断;当降温终了试件中心温度降低至-40℃时,经过 100 次冻融循环后动弹性模量为初始值的 30%,冻融循环次数

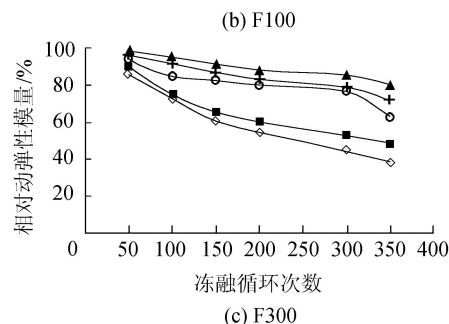
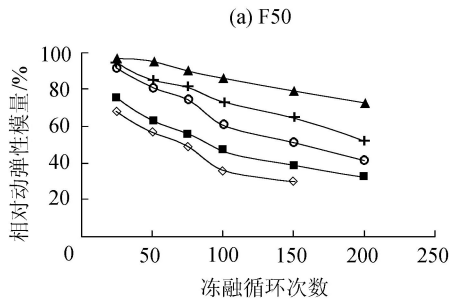
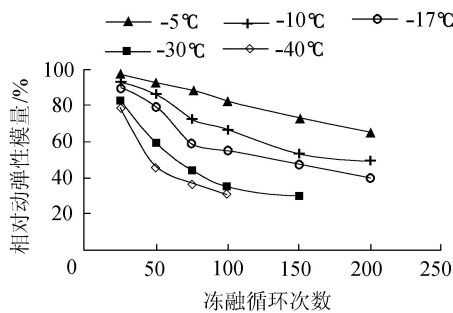


图2 不同抗冻设计等级水工混凝土的动弹性模量变化

继续增加试件被冻断。F100 抗冻设计等级的水工混凝土在降温终了试件中心温度达到 -40°C 时,经过 150 次冻融循环后动弹性模量为初始值的 30%,继续冻融试验试件被冻断。在降温终了试件中心温度从 -5°C 降低到 -40°C 的过程中,经过 350 次冻融循环后,F300 抗冻设计等级的水工混凝土的动弹性模量从初始值的 81% 下降至 39%,表明即使是 F300 高抗冻设计等级的水工混凝土,随着冻融降温终了试件中心温度的降低,其抗冻性能也下降较快。

2.3 水工混凝土能经受的最大冻融循环次数

按照现行 SL352—2006《水工混凝土试验规程》中水工混凝土质量损失 5%、动弹性模量下降至初始值的 60% 的抗冻性能评判标准,图 3 给出了 F50、

F100、F300 抗冻设计等级的水工混凝土在 -5°C 、 -10°C 、 -17°C 、 -30°C 、 -40°C 等 5 个冻融试验降温终了试件中心温度条件下能经受的最大冻融循环次数。

根据图 3 中的试验结果,低、中、高 3 种抗冻设计等级的水工混凝土在不同冻融降温终了低温条件下能经受的最大冻融循环次数的演变规律是一样的,均是随着降温终了试件中心温度的降低而减少。按照 -17°C 降温终了试件中心温度条件冻融确定的 F50 抗冻设计等级水工混凝土,在 -10°C 或 -5°C 低温条件下能经历最大冻融循环次数在 100 次以上,而目前处于气候温和区的水利工程很少能经历 -17°C 低温条件。而对于严寒地区的水利工程而言,即使是依据 -17°C 降温终了试件中心温度条件冻融确定的 F300 抗冻设计等级水工混凝土,当温度继续降低至 -30°C 甚至 -40°C 时,其能经受的最大冻融循环次数在 200 次以下,而目前该气候区域内出现 $-30^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 的低温条件是完全有可能的。

2.4 机理分析

水工混凝土的冻融破坏主要是由一定冻结温度下结冰的水和过冷的水引起,结冰的水产生体积膨胀、过冷的水发生迁移,这两种行为均能引起混凝土内部孔压增大,产生破坏。毛细孔中的含水率超过一定限值时,冻结会产生很大的压力,该压力值除了与毛细孔中的含水率有关外,还与冻结速度有关,5 个冻融降温终了混凝土试件中心温度(-5°C 、 -10°C 、 -17°C 、 -30°C 、 -40°C)对应的降温速率分别为 6.5°C/h 、 9°C/h 、 12.5°C/h 、 19°C/h 和 24°C/h ,与之相对应的是水工混凝土抗冻耐久性呈现降温速率和劣化程度增大的规律。

另外,在现行 -17°C 降温终了混凝土试件中心温度的标准冻融试验方法中,毛细孔中的水会结冰,凝胶孔水一般处于过冷状态,过冷水的蒸气压比相同温度下冰的蒸气压要高,由此导致凝胶孔水向毛细孔中冰的界面渗透的现象,直至达到平衡状态。渗透过程中产生的渗透压力对水工混凝土的抗冻耐久性也会产生影响。在降低降温终了混凝土试件中心温度至 -30°C 甚至 -40°C 时,凝胶孔中处于过冷状态的水量可能会比中心温度为 -17°C 时增加,进而更多的过冷水发生渗透迁移现象,大量过冷水的渗透迁移进一步导致渗透压力的增大,这也是降低冻融过程中水工混凝土试件中心温度后,水工混凝土抗冻耐久性下降的主要原因之一。

3 结 论

a. 随着冻融过程中降温终了试件中心温度的降低,F50、F100、F300 等 3 种代表低、中、高不同抗

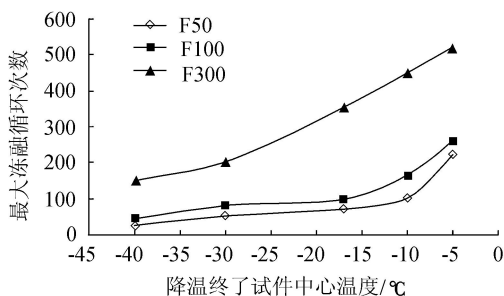


图3 水工混凝土能经受的冻融循环次数

冻设计等级的水工混凝土的质量损失、动弹性模量损失逐渐增大,水工混凝土能经受的最大冻融循环次数逐渐减少。

b. 按照现行-17℃降温终了低温条件冻融方法确定的 F50 抗冻设计等级水工混凝土,在-10℃或-5℃低温条件下能经历最大冻融循环次数在 100 次以上;依据-17℃降温终了低温条件冻融方法确定的 F300 抗冻设计等级水工混凝土,当温度继续降低至-30℃甚至-40℃时,其能经受的最大冻融循环次数在 200 次以下。

c. 冻融低温本身对水工混凝土的抗冻耐久性会产生影响,主要表现为采用更低的混凝土试件中心温度后,混凝土凝胶孔中处于过冷状态的水量增多,过冷水迁移产生较大渗透压力,是水工混凝土产生冻融破坏的主要原因之一;另外,冻融过程中的低温温降速率对水工混凝土的抗冻性能也存在一定影响,随着温降速率的增大,水工混凝土的劣化程度增大。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[R]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[2] 中华人民共和国科学技术部,中国气象局,国家环保总局,等. 气候变化国家评估报告[R]. 北京:科学出版社,2009.

[3] 李金玉,曹建国,徐文雨,等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报,1999,30(1): 41-49. (LI Jinyu, CAO Jianguo, XU Wenyu, et al. Study on the mechanism of concrete destruction under frost action [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30 (1): 41-49. (in Chinese))

[4] 严佳川,邹超英. 冻融循环作用下混凝土材料寿命评估

方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011(6): 11-15. (YANG Jiachuan, ZOU Chaoying. Evaluation method of the service life of concrete under the freeze-thaw action [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011(6): 11-15. (in Chinese))

[5] 刘艳霞,陈改新,鲁一晖. 大坝全级配混凝土抗冻性的试验研究[J]. 水力发电学报,2011,30(1): 139-143. (LIU Yanxia, CHEN Gaixin, LU Yihui. Research on the frost resistance of dam concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30 (1): 139-143. (in Chinese))

[6] 蒋林华,那彬彬,周晓明,等. 冻融与碳化交替作用下的混凝土性能试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(4): 33-36. (JIANG Linhua, NA Binbin, ZHOU Xiaoming, et al. Tests for properties of concrete under alternate freeze-thaw and carbonation actions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(4): 33-36. (in Chinese))

[7] 于孝民,任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(1): 80-82. (YU Xiaoming, REN Qingwen. Fracture release energy for ordinary concrete with freeze-thaw cycles [J]. Journal of Hohai University: Nature Sciences, 2010, 38 (1): 80-82. (in Chinese))

[8] KEVERN J T, ASCE M. Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of previous concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22: 469-475.

[9] HANJARI K Z, UTGENANNT P, LUNDGREN K. Experimental study of the material and bond properties of frost damaged concrete[J]. Cement Concrete Research, 2011, 41(3): 244-250.

[10] 陆采荣,梅国兴,戈雪良,等. 极端气候对水工建筑材料的影响[R]. 南京:南京水利科学研究院,2013.

(收稿日期:2014 - 07 - 15 编辑:骆超)



· 简讯 ·

首届国际水土保持青年论坛在南昌召开

2015 年 10 月 16—18 日,由世界水土保持学会、中国水土保持学会、国际泥沙研究培训中心、江西省科学技术协会、江西省水利厅主办的首届国际水土保持青年论坛在南昌工程学院举行,来自 20 个国家和地区的 150 名代表出席论坛。在为期 3 天的论坛中,来自中国、英国、美国、奥地利、西班牙、澳大利亚、意大利、塞尔维亚等国家的 15 名知名专家学者作特邀报告,围绕土壤侵蚀过程与防治、全球变化与水土保持对策、土地退化与粮食安全、流域管理与可持续发展、青年与水土保持发展、新技术新材料在水土保持中的应用等议题,进行了深入的探讨和交流。论坛还聚焦“青年——水土保持的未来”主题,分 3 个专题,安排了 22 场以青年学者为主体的学术报告,交流和探讨水土保持研究与发展的前沿科学问题。论坛期间,主办方还组织了水土保持实地参观和现场考察,颁发了国际水土保持优秀青年论文奖。

(本刊编辑部供稿)